

0-734423 - |

На правах рукописи

БОРИСОВА ОЛЬГА ВЛАДИМИРОВНА

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКАЯ СИСТЕМА
ТОЧНОГО ЗАДАНИЯ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ
С СИНХРОННО-РЕАКТИВНЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ

Специальность 05.09.03 - электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Казань - 2003

Диссертация выполнена на кафедре электропривода и электротехники Казанского ордена Трудового Красного Знамени государственного технологического университета.

Научный руководитель:

доктор технических наук,
профессор Миляшов Н.Ф.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук,
профессор А.И. Федотов,
кандидат технических наук,
профессор А.И. Карань

Ведущее предприятие: ФГУП Всероссийский научно-исследовательский институт расходомерии (г. Казань)

Защита состоится 10 июня 2003 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета К 212.079.02 в Казанском государственном техническом университете им. А.Н. Туполева по адресу: г. Казань, ул. Толстого, 15 (3-е учебное здание КГТУ), ауд. 317.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке КГТУ им. А.Н. Туполева.

Ваши отзывы, заверенные печатью, в двух экземплярах просим высылать по адресу: 420111, Республика Татарстан, г. Казань, ул. К. Маркса, 10.

Автореферат разослан « 6 » мая 2003 г.

Ученый секретарь
диссертационного Совета,
д.т.н., профессор



А.Ю. Афанасьев

Актуальность работы. Появление новой техники и совершенствование технологии современной промышленности предъявляют повышенные требования к ряду электромеханических систем в отношении точности частоты вращения ведущего вала. Такие системы применяются в машиностроении, металлургии, станкостроении, химической промышленности при получении тонких плёнок и волокон, измерительной технике, приборостроении, метрологии, космической технике и других отраслях.

Для электротехнических систем точного задания частоты вращения (СТЗЧВ) используются автоматизированные электроприводы постоянного и переменного тока, которые содержат в своей структуре традиционные и специальные электрические машины, элементы силовой полупроводниковой техники и управляющих микропроцессорных систем. Для таких электротехнических систем характерна тесная взаимосвязь электромеханической части с цепями ее питания и регулирования. Подобные устройства с электромеханическим приводом получили название мехатронных систем (МТС), и их все чаще рассматривают как единую электротехническую систему с интегральными характеристиками.

Для СТЗЧВ наиболее перспективен электропривод с синхронными двигателями. В отличие от асинхронного привода и, особенно, привода постоянного тока, для стабилизации средней частоты вращения здесь не требуется введение корректирующих звеньев, так как её величина полностью определяется частотой напряжения питания электродвигателя.

Наряду с требованиями стабилизации средней частоты вращения, в последние годы к СТЗЧВ предъявляют требование обеспечения равномерности вращения ротора в пределах одного оборота, т.е. стабилизации мгновенной частоты вращения. Особенно важным этот вопрос является в метрологических установках для определения мгновенного расхода жидкости или газа, а также для электродвигателей работающих в режиме электрического вала, где от синхронности работы каждого из двигателей зависит качество выпускаемой продукции.

Для СТЗЧВ малой мощности перспективно применение в качестве силового агрегата синхронно-реактивного электродвигателя (СРД). Упрощение конструкции электрической машины компенсирует в этом случае снижение энергетических и механических характеристик электропривода. Для многих теоретических и практических вопросов создания регулируемых электроприводов с СРД в настоящее время найдены решения, позволяющие на практике осуществить построение СТЗЧВ наиболее целесообразным образом. Однако ряд возникающих при этом проблем полностью не решен и требует дополнительных исследований.

Следует отметить, что недостаточно изучен ряд теоретических вопросов, связанных с процессом преобразования энергии в МТС с СРД, мощность которых соизмерима с мощностью источника питания. Не определены однозначные требования и рекомендации по созданию всей МТС в целом, позволяющие проектировать системы с высокой точностью задания и стабильностью мгновенной частоты вращения. Представляет интерес исследование вопроса о необходимости принятия дополнительных мер по стабилизации момента и частоты вращения вала привода в широком диапазоне их изменения.

Для решения названных задач еще на стадии создания СТЗЧВ необходимо рационально выбрать или разработать математическую модель МТС с СРД, а также методику и средства для её исследования.

Следует отметить, что математическое моделирование и проектирование современных структурированных МТС значительно усложняется. Это определяет актуальность задачи совершенствования известных и разработки новых специальных моделей, которые в первую очередь ориентированы на применение современных вычислительных средств и компьютерных технологий исследований.

Цель работы. Совершенствование методов исследования установившихся электромеханических процессов в МТС с СРД, предназначенных для работы в СТЗЧВ, позволяющее осуществить рациональный выбор параметров привода при заданной точности поддержания средней и мгновенной частот вращения вала двигателя.

Задача научного исследования. Разработка компьютерной модели частотно-регулируемой МТС с СРД для исследования влияния параметров системы электропривода и механической нагрузки на его мгновенные электромеханические характеристики, и, в первую очередь, на пульсации частоты вращения в установившемся режиме работы.

Данная задача была решена в следующих направлениях:

- анализ конструкций, функциональных схем и характеристик существующих СТЗЧВ, путей развития и совершенствования их электропривода, оценка современных методов их исследования;
- разработка математических моделей отдельных звеньев и всей МТС с СРД в целом во временной области и фазной системе координат для компьютерного исследования процесса электромеханического преобразования энергии;
- создание компьютерной модели МТС с СРД в среде Delphi, включая разработку принципов задания параметров, законов изменения и взаимосвязи основных компонент модели, для исследования влияния основных её параметров на изменение средней и пульсации мгновенной частоты вращения электропривода;

- исследование влияния пульсаций напряжения в звене постоянного тока, параметров механической нагрузки на изменение мгновенной и величину средней частот вращения двигателя, исследование основных закономерностей этого процесса;
- анализ результатов компьютерного моделирования и экспериментального исследования, макетирования и внедрения.

Методы исследования. Базировались на теории дифференциальных уравнений, на методе использования переключающих функций полупроводниковых коммутаторов, на компьютерных методах моделирования с использованием специальных моделей в среде программирования Delphi. При экспериментальном исследовании использовано осциллографирование токов и напряжений, определены средний электромагнитный момент, средние и мгновенные частоты вращения привода.

Научная новизна. В процессе исследований получены следующие новые научные результаты, выносимые на защиту:

1. Разработана математическая модель электромеханических процессов в МТС с СРД и явно выраженным звеном постоянного тока во временной области и фазной системе координат для целей компьютерного исследования методом прямого программирования в среде Delphi.

2. Разработана компьютерная модель МТС с СРД, в результате чего создана эффективная методика исследования мгновенных характеристик процесса электромеханического преобразования энергии в синхронно-реактивном электроприводе.

3. Исследован процесс электромеханического преобразования энергии в компьютерной модели МТС с СРД, определены основные его характеристики для случая работы электропривода в СТЗЧВ,

4. В установившемся режиме работы проанализировано влияние цепей управления и питания, а также механической нагрузки на мгновенную и среднюю частоты вращения электропривода, обоснованы границы применимости модели.

Обоснованность и достоверность полученных результатов и вытекающих из них выводов обеспечена в рамках принятых математических моделей с использованием современных численных методов математики, метода программирования на алгоритмическом языке высокого уровня, методов исследования объектов механики, электротехники и автоматического управления, а также проверкой расчетных результатов многочисленными экспериментами.

Практическая ценность:

1. Разработан и обоснован подход к расчету характеристик МТС с СРД в виде единой электротехнической системы, который позволяет повысить точность и достоверность получаемых результатов и спроектиро-

вать систему привода с рациональными параметрами.

2. Методика численного анализа установившегося процесса электро-механического преобразования энергии и созданная по ней компьютерная программа расчета позволяют более точно исследовать широкий класс характеристик МТС с СРД, работающих в СТЗЧВ.

3. Анализ влияния цепей питания и законов управления МТС, а также вида механической нагрузки привода на характеристики СРД позволяет дать практические рекомендации по выбору и проектированию параметров отдельных элементов системы с учетом влияния их друг на друга.

Реализация результатов. Разработанные методы, алгоритмы, расчетные методики и устройства использовались в ОАО "Нефтехимпроект" г. Казань и в Казанском государственном технологическом университете при разработке, изучении и исследовании электроприводов с синхронными двигателями.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на всероссийской научной конференции "Динамика нелинейных электромеханических и электронных систем." (Чебоксары, ЧГУ, 2001 г.), на 12-ой научно-технической конференции "Электроприводы переменного тока" (г. Екатеринбург, УГТУ-УПИ, 2001 г.), на XIII и XIV всероссийских межвузовских научно-технической конференциях "Внутрикамерные процессы в энергетических установках, акустика, диагностика, экология." (г. Казань: КФВАУ, 2001 и 2002 г.), на научно-технических и учебно-методических конференциях и семинарах КГТУ (КХТИ), г. Казань.

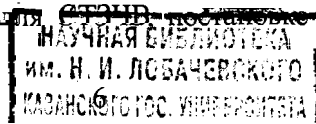
Публикации по работе: По материалам диссертации опубликовано 7 печатных работ.

Структура и объём работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 160 источников. Работа содержит 135 страниц основного текста, 52 рисунка и 1 приложение.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность проблемы исследования, определена цель, научная проблема и задачи исследования, изложены основные научные результаты, выносимые на защиту, практическая ценность работы, апробация и реализация результатов, определены ее структура, объем и содержание.

Первая глава диссертации "Состояние вопроса и постановка задачи исследования" посвящена анализу современного этапа развития теории и практики электропривода для СТЗЧВ, постановке задач теоретического



исследования и практической разработки. Проанализированы такие вопросы, как: перспективы развития и принципы построения электропривода СТЗЧВ, работа СРД в СТЗЧВ, анализ причин, влияющих на частоту вращения СРД.

Сделан вывод о том, что наибольшее влияние на равномерность мгновенной частоты вращения высокоточных приводов с СРД оказывает непостоянство электромагнитного момента, развиваемого двигателем в течение оборота вращения ротора из-за ряда причин, основной среди которых является питание двигателя от статического преобразователя частоты с конечными параметрами цепей питания и управления. Именно исследование этого вопроса является основной научной и практической целью диссертации.

Вторая глава диссертации "Математическая модель механотронной системы с СРД" посвящена вопросам разработки математической модели отдельных звеньев и всей системы привода в целом во временной области и фазной системе координат. Подобный подход снимает ряд известных ограничений, связанных с применением линейных преобразований осей электрической машины и необходимостью линеаризации ее параметров. Блок-схема силовой части МТС с СРД показана на рис. 1.

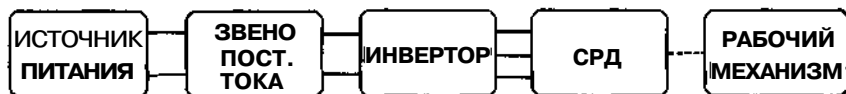


Рис. 1

Так как мощность привода с СРД невелика, то источником питания чаще всего служит однофазная сеть переменного тока промышленной частоты. В этом случае в схеме электропривода обязательно наличие звена постоянного тока, состоящего из полупроводникового выпрямителя и сглаживающего фильтра. Выпрямленное напряжение поступает на вход трехфазного транзисторного инвертора, к выходу которого подключен трехфазный СРД, приводящий в действие рабочий механизм.

Аналитическое исследование процессов в отдельных звеньях структурной схемы МТС позволило ввести ряд существенных упрощений в ее математическую модель и расчетную схему замещения. Эти упрощения не связаны с введением дополнительных ограничений и позволяют значительно снизить порядок системы дифференциальных уравнений в математической модели.

При анализе значительное внимание уделено вопросам моделирования управляющих полупроводниковых элементов в силовых цепях привода. В качестве основного параметра их выбрана переключающая функ-

ция, содержащая три временные параметра: время включения t_{0k} , время отключения t_{tk} и период повторяемости процесса коммутации T_k , где индекс k определяет номер рассматриваемого вентиля. Переключающая функция $h_k(t)$ была записана с помощью единичных функций Хевисайда:

$$h_k(t) = h_{0k}(t) - h_{tk}(t) = \sum_{n=0}^{\infty} \{1[t - (t_{0k} + nT_k)] - 1[t - (t_{tk} + nT_k)]\} \quad (1).$$

В формуле (1) периодические единичные функции начала и конца интервала включения вентиля $h_{0k}(t)$ и $h_{tk}(t)$ записаны в виде временных рядов $\sum_{n=0}^{\infty} 1[t - (t_{0k} + nT_k)]$ и $\sum_{n=0}^{\infty} 1[t - (t_{tk} + nT_k)]$. Независимым параметром в формуле (1) является время t . Номер рассматриваемого периода изменения переменной n определяется как целая часть отношения текущего времени t к величине периода повторяемости коммутации T_k , т.е. $n = [t / T_k]$.

Переключающая функция коммутатора несет в себе всю информацию об его управляющих свойствах, необходимую для моделирования его на ЭВМ. Так как время собственной коммутации силовых вентилей схемы на несколько порядков меньше времени изменения электромагнитных процессов в исследуемой МТС, а сама МТС относится к разряду относительно высоковольтных, то допустимо моделирование коммутатора в открытом состоянии с помощью только одного неизменного активного сопротивления. В этом случае в электрической схеме замещения МТС звено выпрямителя можно рассматривать совместно со звеном источника. Количество ветвей расчетной схемы в этом случае уменьшается, а качественные и количественные характеристики МТС при исследовании не изменяются. Кроме того, электрический фильтр в ЗПТ также целесообразно объединить с двумя названными структурными звеньями в единое звено эквивалентного источника энергии, расчетная схема замещения которого показана на рис. 2.

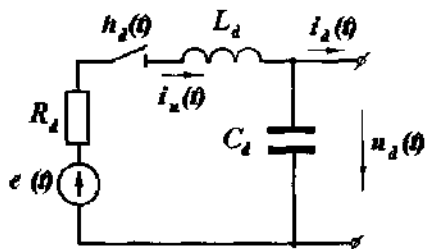


Рис. 2

Параметрами схемы замещения являются: э.д.с. эквивалентного источника $e_d(t)$, его активное сопротивление R_d , индуктивность L_d и ёмкость C_d , а также переключающая функция $h_d(t)$. В диссертации определены расчетные формулы параметров схемы на рис. 2, характеризующие типовые схемы однофазных регулируемых выпрямителей и фильтров.

Так как в схеме электропривода используются трехфазные мостовые схемы преобразователей частоты (ПЧ) на транзисторах с высоким коэффициентом усиления, то влияние цепей их управления на процессы в силовой части при моделировании не учитывались. Сопротивления транзистора и инверсного ему обратного диода в схеме инвертора в открытом состоянии приняты равными по величине, что дало возможность представить каждое плечо моста ПЧ в виде идеального коммутатора. В качестве основных характеристик коммутатора приняты его переключающая функция и внутреннее активное сопротивление. Использование переключающих функций также позволило представить вентильные цепи в схеме ПЧ эквивалентными электрическими цепями без вентиляей. В любой момент времени последовательно с фазой нагрузки ПЧ включено только одно сопротивление идеального коммутатора, что позволило вынести его в цепь переменного тока и при последующем моделировании объединить с сопротивлением обмоток статора СРД. В этом случае уравнения и характеристики привода определяются уравнениями и характеристиками двигателя с увеличенными первичными сопротивлениями, фазное напряжение которого имеет ступенчатую форму.

При моделировании СРД в качестве базовой модели использована линейная математическая модель симметричной синхронной машины с трехфазной обмоткой на статоре, обмоткой возбуждения и полной демпферной обмоткой на роторе. При составлении математической модели электрической машины придерживались общепринятых допущений. Так обмотки трехфазной СМ симметрично расположены на статоре (оси A , B и C) и роторе (оси d и q) и приведены по числу витков. Магнитная проницаемость стали является бесконечно большой по сравнению с магнитной проницаемостью воздуха. При расчете магнитного поля взаимной индукции учитывались только основные гармонические радиальной составляющей индукции в зазоре. Кроме того, были учтены особенности конструкции СРД.

Система дифференциальных уравнений электрического равновесия напряжений на обмотках СМ записана в виде уравнений Максвелла в матричной форме:

$$U = Ri + p\Psi = Ri + p[LiJ = Ri + Lpi + ipL, \quad (2)$$

где $p = d/dt$ - оператор дифференцирования, U и i - матрицы-столбцы фазных напряжений и токов, R - диагональная матрица активных сопротивлений обмоток ротора и статора, L - квадратная матрица собственных и взаимных индуктивностей обмоток.

Таким образом, математическая модель синхронно-реактивного привода включает в себя расчетные формулы для определения основных мгновенных характеристик работы системы, которые записаны во временной области и фазной системе координат. С их помощью можно проанализировать динамику электромагнитных и электромеханических процессов в приводе и определить основные энергетические и механические характеристики.

В третьей главе диссертации "Компьютерное моделирование переходных процессов в МТС с СРД" обоснован выбор стратегии, метода и средств численного моделирования для точного определения мгновенных характеристик процесса электромеханического преобразования энергии. В качестве основного выбран перспективный метод компьютерного моделирования в среде программирования Delphi, которая обладает всеми качествами системы моделирования высокого уровня.

Разработана компьютерная модель электропривода и определены способы задания параметров отдельных элементов схемы его замещения и законов их изменения. Всего можно задать 14 основных электромеханических характеристик электропривода. Остальные величины, необходимые для моделирования, рассчитываются программой самостоятельно.

Панель ввода исходных данных расчета разбита на 7 основных блоков, четыре из них соответствуют количеству укрупненных звеньев математической модели электропривода, разработанной во 2 главе диссертации. Эквивалентный источник питания имеет три варианта исполнения: в виде трехфазного источника переменного тока и на основе однофазного или трехфазного источников переменного тока с выпрямителем.

Программа предоставляет широкие возможности по моделированию механической нагрузки электропривода. Нагрузка статического характера задается в соответствии с классическим уравнением момента тремя основными параметрами: постоянной составляющей, пропорциональным и экспоненциальным коэффициентами. Пульсирующая составляющая механической нагрузки определяется также тремя параметрами: постоянной составляющей, амплитудой и частотой пульсаций.

На панели задания исходных данных можно определить начальные

условия расчета. Параметры численного интегрирования дифференциальных уравнений движения электропривода включают в себя шаг, начальное и конечное время процесса.

Кроме того, программа позволяет задать величины напряжения на обмотках по осям ротора d, q, f , т.е. исследовать более широкий класс задач, чем электропривод с СРД.

Проведено компьютерное исследование электромагнитных и электромеханических процессов в схеме электропривода в переходных процессах для различных вариантов его питания. Это позволило путем тестовых расчетов проанализировать возможности системы моделирования для исследования мгновенного электромагнитного момента и мгновенной частоты вращения ротора СРД, а также дать оценку результатов в сравнении с известными и данными экспериментального исследования, которые приведены в главе 4 диссертации. Сделан вывод о высокой точности разработанной имитационной модели и адекватности результатов расчета физическим процессам в реальных МТС с СРД.

В четвертой главе диссертации "Практическая реализация, экспериментальное и компьютерное исследование электропривода с СРД" рассмотрены такие вопросы, как работа электропривода с СРД в устройстве точного задания частоты вращения, принцип действия и схема измерителя мгновенной частоты вращения привода. Значительное внимание уделено анализу результатов теоретического и экспериментального исследования влияния различных факторов на мгновенную частоту вращения привода с СРД.

Экспериментальная установка точного задания частоты вращения обладает следующими характеристиками:

- во всем диапазоне частот вращения изменение частоты вращения вала двигателя должно происходить с дискретностью 1 об/мин;
- погрешность задания средней частоты вращения ω_p должна быть не более 0,1%, а мгновенной $\Delta\omega$ - 0,3 рад/с;
- диапазон изменения частоты вращения электропривода от 500 до 3000 об/мин.

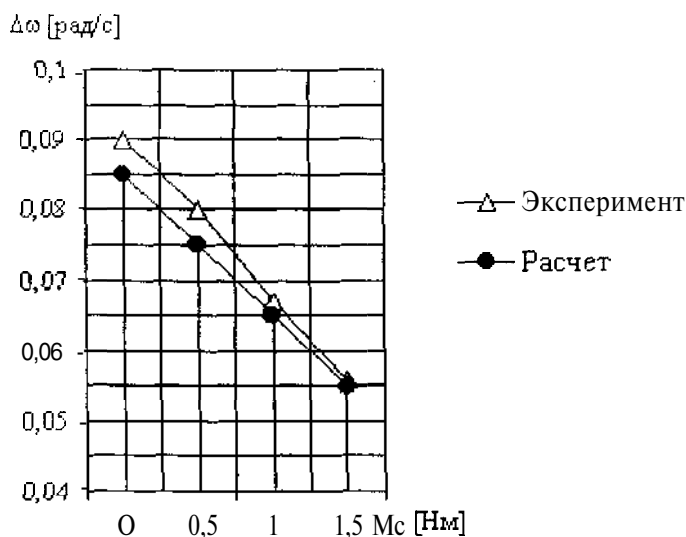
В экспериментальной установке были использованы конструктивная основа и магнитопровод серийного асинхронного двигателя АОЛ-2-12-2. Статорная обмотка была оставлена без изменений, на роторе явнополюсность была получена путем вырубki соответствующих частей магнитопровода. Для определения параметров двигателя было изготовлено два идентичных ротора, причем один ротор был выполнен без короткозамкнутых колец.

Значительная часть 4 главы посвящена анализу влияния на мгновенную частоту вращения привода с СРД следующих факторов:

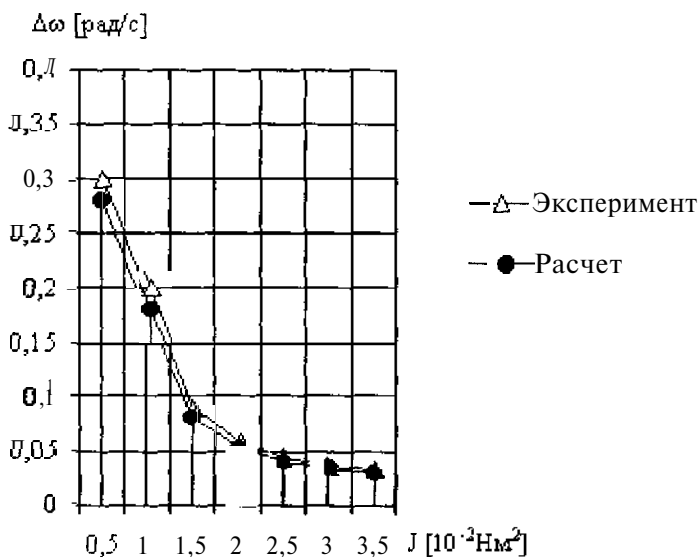
- значение средней частоты вращения ротора ω_p ;
- величина статического момента нагрузки M_C ;
- суммарный момент инерции на валу электродвигателя J .
- суммарная индуктивность L_d , которая складывается из индуктивностей источника энергии L_H и цепи фильтра L_Φ ;
- ёмкости C_d , которая равна ёмкости цепи фильтра C_Φ .

На рис. 3 *а, б, в*. в построены кривые изменения $\Delta\omega$ электропривода, полученные путем расчета с помощью системы компьютерного моделирования главы 3 и определенные экспериментально.

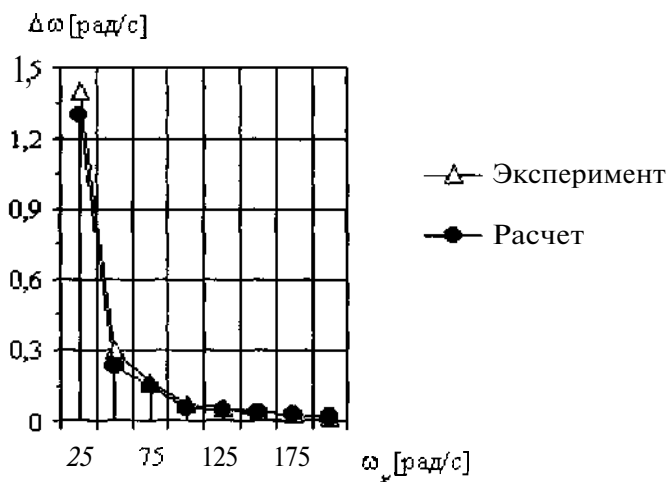
Анализируя ход кривых, можно сделать вывод о том, что компьютерная модель электропривода с СРД с высокой степенью точности соответствует характеру протекания физических процессов в системе и может быть с высокой степенью достоверности и адекватности быть использована для теоретического исследования особенностей этих процессов.



а). $\omega_p = 110,038 \text{ с}^{-1}$, $J = 0,01963 \text{ Н}\cdot\text{м}^2$, $L_d = 6 \text{ мГн}$, $C_d = 1000 \text{ мкФ}$;



б). $\omega_p = 110,038 \text{ с}^{-1}$, $M_C = 0,83 \text{ Н·м}$, $L_d = 6 \text{ тГн}$, $C_d = 1000 \text{ мкФ}$;



в/ $J = 0,01963 \text{ Н·м}^2$; $M_C = 0,83 \text{ Н·м}$, $L_d = 6 \text{ тГн}$, $C_d = 1000 \text{ мкФ}$.

Рис. 3. Экспериментальные и расчетные кривые изменения $\Delta\omega$

Не менее важно соответствие расчетных и экспериментальных кривых изменения мгновенной частоты вращения $\omega(t)$ или отклонения мгновенной частоты от среднего значения $\Delta\omega(t)$. В диссертации проведена оценка точности и адекватности компьютерной модели путем сравнения кривых изменения $\Delta\omega(t)$ за 1/6 часть периода первой гармоники фазного напряжения СРД. Как видно из графиков мгновенной частоты на рис. 4, отклонение расчетных значений $\Delta\omega$ от экспериментальных данных не превышает 6 %.

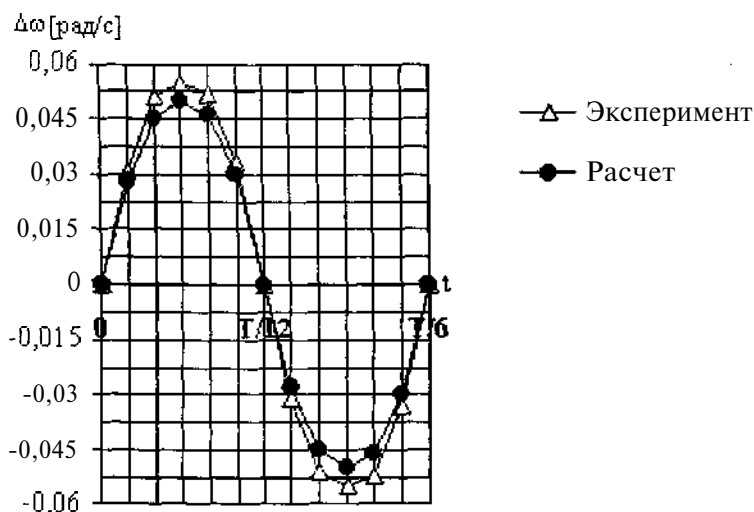


Рис. 4. Графики изменения $\Delta\omega$ при параметрах эквивалентного источника: $L_d = 6$ тГн и $C_d = 10000$ мкФ, $\omega_p = 110,038$ с⁻¹, $J = 0,01963$ Н·м², $M_C = 0,83$ Н·м;

Сильное влияние на мгновенную частоту вращения оказывают значения индуктивности и ёмкости в эквивалентном источнике питания. В диссертации исследована зависимость отклонения частоты $\Delta\omega$ от названных величин при различных значениях частоты вращения ротора, что позволяет по заданной величине пульсации мгновенной частоты осуществить рациональный выбор параметров звена источника питания. Кривые рассчитаны при неизменном моменте сопротивления нагрузки, а процесс регулирования осуществлялся на основании основного закона частотного управления. Исследования показали, что влияние ёмкости на отклонения частоты $\Delta\omega$ значительно сильнее, так как эквивалентный

источник питания по своим характеристикам ближе к источнику напряжения, чем к источнику тока (индуктивность фаз электродвигателя много больше индуктивности цепи источника).

В электротехнических установках электропривод работает на механическую нагрузку с различными законами изменения момента сопротивления на валу электродвигателя. В связи с этим, в диссертации проведено исследование влияния величины ёмкости C_d на вид кривой мгновенной частоты вращения $\omega(t)$ при различных значениях частоты вращения СРД и трех вариантах изменения момента сопротивления нагрузки:

- при неизменном по величине сопротивлении нагрузки $M_C - const$;
- при вентиляторном характере нагрузки;
- при пульсирующем характере нагрузки.

Результаты исследования показали, что амплитуда отклонения частоты $\Delta\omega$ существенно увеличивается по мере уменьшения частоты вращения электропривода. Еще более резко изменяется относительное значение $\Delta\omega$. Амплитуда отклонений частоты $\Delta\omega$ существенно зависит также от величины и от закона изменения момента сопротивления нагрузки $M_C(\omega)$.

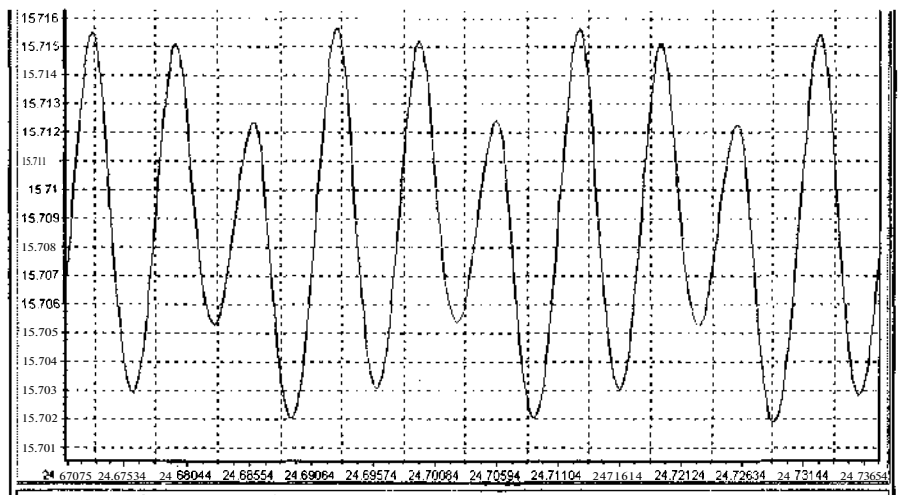
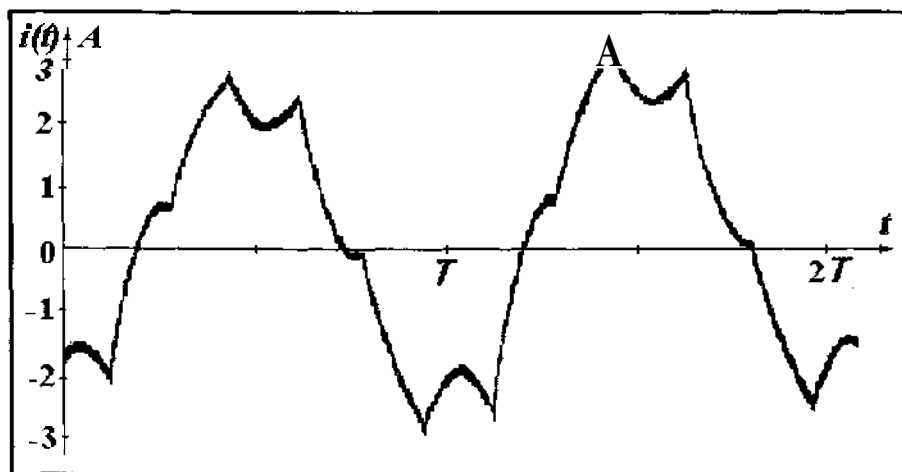
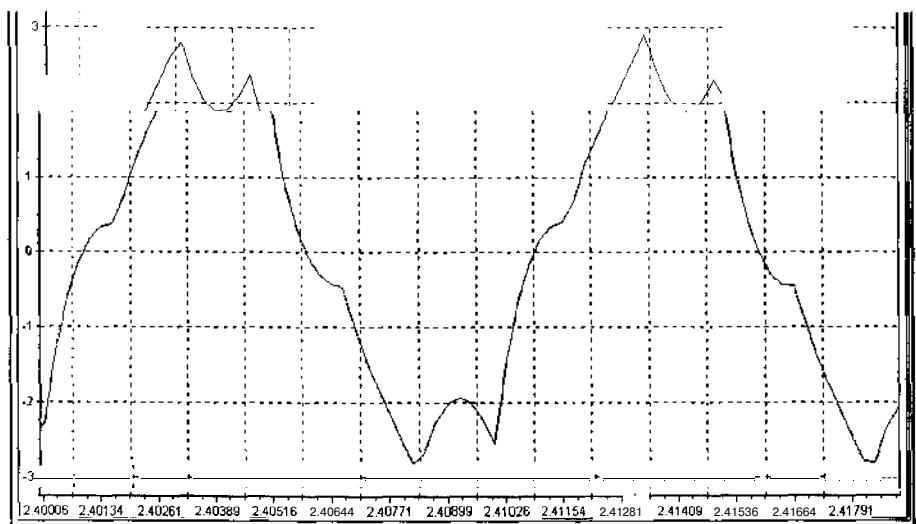


Рис. 5. Расчетные кривые мгновенной частоты вращения $\omega_p(t)$ при $\omega_p = 157,08$ рад/с⁻¹, $C_d = 500$ мкФ, $J = 0,0066$ Н·м², $M_C = 0,24$ Н·м;
 $L_d - 6$ тГн



а).



б).

Рис. 6. Осциллограмма и результаты расчета фазного тока СРД при $n = 3000$ об/мин

С помощью созданной компьютерной модели проанализирован ход кривых $\omega(t)$ в установившемся режиме работы электропривода, что прежде всего связано с пульсациями напряжения на выходе звена постоянного тока из-за конечной величины коэффициента сглаживания электрического фильтра. На рис. 5 показаны расчетные графики мгновенной частоты вращения $\omega(t)$ при значениях ёмкости C_d — 500 мкФ, из которых видно, что искажения кривой растут с уменьшением величины ёмкости. В кривых мгновенной частоты явно проглядывается амплитудная модуляция с частотой выпрямленного напряжения.

Осциллограмма фазного тока двигателя и данные компьютерного моделирования привода при $n = 3000$ об/мин представлены на рис. 6 а, б. Анализ этих зависимостей также свидетельствует о высокой степени их физического и численного соответствия друг другу.

В заключении диссертации подведены результаты исследований и сделан вывод о том, что в работе решена проблема разработки компьютерной модели частотно-регулируемой МТС с СРД для исследования влияния параметров системы электропривода и механической нагрузки на его мгновенные электромеханические характеристики, и, в первую очередь, на пульсации частоты вращения в установившихся режимах работы, имеющая важное техническое значение.

Решены следующие научные вопросы:

1. Проведен анализ конструкций, функциональных схем и характеристик, существующих электротехнических СТЗЧВ, концепций их развития и совершенствования, современных методов их анализа, сформулированы задачи исследования и общие пути их решения.

2. Разработаны математические модели отдельных звеньев и всей МТС с СРД в целом во временной области и фазной системе координат с использованием понятий переключающих функций полупроводниковых вентилей, которые предназначены для компьютерного исследования динамики процесса электромеханического преобразования энергии и максимально адекватны физике процессов в системе.

3. Создана компьютерная модель МТС с СРД в среде Delphi, разработаны основные принципы задания параметров, законов изменения и взаимосвязи основных компонент модели, что позволяет исследовать влияние всех этих величин на пульсации мгновенной частоты вращения электропривода с минимальными допущениями.

4. Проанализировано влияние пульсаций напряжения в звене постоянного тока и параметров механической нагрузки в регулируемых МТС с СРД на пульсации мгновенной и величину средней частот вращения электродвигателя, исследованы основные закономерности этого процесса, определена допустимая величина пульсаций, что позволяет рацио-

нально выбрать параметры привода для СТЗЧВ.

5. Дан анализ результатов компьютерного моделирования и экспериментального исследования, макетирования и внедрения.

Получены новые практические результаты:

1. Разработан и обоснован новый подход к расчету характеристик МТС с СРД в виде единой электротехнической системы, позволяющий значительно повысить точность и достоверность получаемых результатов; с помощью которого можно сконструировать систему с рациональными параметрами и рассчитать основные характеристики процесса электромеханического преобразования энергии в ней.

2. Разработан метод исследования и расчета динамики процесса электромеханического преобразования энергии в МТС с СРД с использованием среды программирования высокого уровня; созданная по ней машинная программа расчета позволяет точно определить широкий класс электрических и механических характеристик электропривода СТЗЧВ.

3. Проведен анализ количественного влияния параметров цепей питания и законов управления МТС, а также вида механических характеристик привода на механические характеристики СРД, позволяющий спроектировать отдельные элементы системы с учетом влияния их друг на друга и создать систему привода с рациональной структурой и характеристиками.

В приложении приведены сведения о внедрении результатов диссертации.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Зиннер А. Л., Ашихмин А.В., Борисова О.В., Валиуллин Р.Р. К вопросу определения параметров синхронно-реактивных двигателей. Изв. вузов. Проблемы энергетики, 1999, № 5-6. - С. 99-106.
2. Зиннер А. Л., Ашихмин А.В., Борисова О.В., Реактивный момент вентильного двигателя, обусловленный эксцентрично расположенным возбужденным ротором. Изв. вузов. Проблемы Энергетики, 2000, №3-4. - С. 107-111.
3. Валиуллин Р.Р., Борисова О.В., Определение пульсирующих и вибрационных составляющих момента в системе управляемый инвертор - синхронно-реактивный двигатель. // М-лы IV Всерос. науч. конф. "Динамика нелинейных электромеханических и электронных систем". - Чебоксары: ЧГУ. 2001. - С. 95-97.
4. Борисова О.В. Математическое моделирование синхронно-реактивного электропривода. // М-лы IV Всерос. науч. конф. "Динамика нелинейных электромеханических и электронных систем." - Чебоксары: ЧГУ. 2001. - С. 94-95.
5. Миляшов Н.Ф., Борисова О.В. Синхронный электропривод с автогенераторным управлением. // Труды 12 науч.-техн. конф. "Электроприводы переменного тока". - Екатеринбург: УГТУ-УПИ. 2001. - С. 154-156.
6. Цвенгер И.Г. Миляшов Н.Ф., Борисова О.В. Электромагнитные процессы в электроприводе автономных объектов. // Тез. докл. XIII Всерос. межвуз. науч.-техн. конф. "Внутрикамерные процессы в энергетических установках, акустика, диагностика, экология". Ч. II. - Казань: КФВАУ. 2001. - С. 223.
7. Миляшов Н.Ф., Валиуллин Р.Р., Гайнутдинов М.Р., Борисова О.В. Пульсирующие и вибрационные составляющие момента электропривода с синхронно-реактивным двигателем. // Тез. докл. XIV Всерос. межвуз. науч.-техн. конф. "Внутрикамерные процессы в энергетических установках, акустика, диагностика, экология". - Казань: КФВАУ. 2002. - С. 121-122.

